

УДК 50.388.2

**МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ХАРАКТЕРИСТИК ИОНОСФЕРЫ
ДЛЯ ЗАДАННОГО РЕГИОНА И КОРРЕКЦИЯ МОДЕЛЕЙ
ИОНОСФЕРЫ В ИНТЕРЕСАХ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН
ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА**

Арефьев В.И., Кочерова М.К., Талалаев А.Б., Тихонов В.В.
ЗАО «РТИС ВКО», г. Тверь

Поступила в редакцию 28.01.2016, после переработки 26.02.2016.

В работе предлагается методика, позволяющая корректировать глобальную модель ионосферы по данным текущих измерений ее параметров. Проведен обзор существующих средств диагностики характеристик ионосферы, обоснован минимальный состав автономного комплекса измерения ее параметров. Обоснована необходимость гелиогеофизического мониторинга ионосферы в интересах радиоэлектронных средств различного назначения.

Ключевые слова: ионосфера, декаметровый диапазон волн, ионозонд вертикального зондирования, полное электронное содержание, навигационные системы ГЛОНАСС, GPS, условия распространения радиоволн.

Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика. 2016. № 1. С. 33–51.

1. Введение

В настоящее время, несмотря на переход радиосвязи вещательных и телевизионных радиосистем на частоты выше 100 МГц, многие средства связи и локации используют декаметровый диапазон от 3 до 30 МГц. Хорошо разработанная технология изготовления радиоаппаратуры декаметрового диапазона, ее высокая надежность и невысокая стоимость позволяют использовать данный частотный диапазон и сейчас. Основным достоинством данного диапазона является возможность загоризонтной связи и локации на большие дальности (от 100 до 3000-8000 км). На условия распространения радиоволн данного диапазона существенное влияние оказывает состояние ионосферы на радиотрассе, в первую очередь в районе входа радиолуча в ионосферу.

К основным факторам, влияющим на качество радиосвязи и радиолокации, относятся:

1. Состояние Солнечной активности и связанной с ней магнитной активности Земли.
2. Возможность отражения радиоволн от различных слоев ионосферы, если рабочие частоты близки к критическим частотам этих слоев.

3. Сезонные, месячные колебания значений критических частот и связанных с ними других параметров.
4. Суточные изменения максимально применимых частот (МПЧ), оптимальных рабочих частот (ОРЧ), наименьших применимых частот (НПЧ).
5. Замирания сигнала передатчика в точке приема, связанные с многолучевостью распространения радиоволн.
6. Внезапные изменения состояния ионосферы, приводящие к поглощению радиоволн, диффузности.
7. Непредсказуемые появления спорадического слоя E_S .
8. Положительные и отрицательные возмущения ионосферы, приводящие к невозможности ведения связи на прогнозируемых частотах.
9. Зависимость уровня сигнала в точке приема от близости к ОРЧ.
10. Зависимость уровня сигнала в точке приема от мощности передатчика и характеристик диаграмм направленности (ДН) его антенны (ширина ДН в азимутальной и угломестной плоскостях, угла излучения, коэффициент направленного действия (КНД)), применяемой приемной антенны), характеристик приемной аппаратуры, вида принимаемого сигнала.
11. Зависимость уровня принимаемого сигнала в точке приема от уровня помех от других РЭС, работающих на этих же частотах из-за многоскачкового распространения радиоволн.
12. Зависимость уровня принимаемого сигнала в точке приема от уровня естественных и индустриальных помех.

Наличие этих факторов значительно затрудняет работу радиоэлектронных средств декаметрового диапазона, в первую очередь проведение измерений в запланированное время. Однако, большая дальность действия, возможность загоризонтной локации, линии связи, существующие на разных направлениях длительное время, продолжают привлекать к данному диапазону большое внимание.

2. Постановка задачи

Для реализации всех положительных возможностей средств декаметрового диапазона волн необходимо компенсировать отрицательные факторы, влияющие на распространение радиоволн данного диапазона. Данная работа и посвящена анализу способов их учета и уменьшения влияния.

Отмеченные факторы и обстоятельства подчеркивают актуальность оценки и контроля параметров ионосферы, и на основе знаний параметров распространения радиоволн (РРВ) можно осуществлять прогнозирование для заданных радиотрасс. За десятилетия изучения ионосферы в этом направлении накоплен богатый научный и практический опыт. Значительный вклад в изучение ионосферы

и распространения радиоволн внесли советские и российские ученые. Наблюдения за состоянием ионосферы ведутся на всей территории Земли с использованием различных станций наблюдения. Основу этих станций представляют станции вертикального зондирования ионосферы (ВЗ). Часть ионозондов расположена на территории России. В последнее десятилетие большое распространение получило радиозондирование ионосферы сверху с использованием сигналов навигационных ИСЗ типа GPS и ГЛОНАСС (так называемое трансionoсферное зондирование - ТИЗ). Более подробно по возможностям метода ТИЗ информация приведена в работах [1–3] и ряде других. Ионосферное зондирование сверху и снизу, дополняя друг друга, позволяет получить полный профиль распределения электронной концентрации на высоте. Возможность прямого получения профиля дает зондирование с помощью ракет, однако этот способ достаточно дорогой.

Наиболее мощным экспериментальным средством, позволяющим получать данные не только о профиле электронной концентрации, но и об электронной и ионной температурах и частоте соударений, являются установки некогерентного рассеяния радиоволн. К сожалению, они дороги и во всем мире действует всего несколько станций.

Альтернативным способом, позволяющим в сочетании с наблюдениями давать требуемую текущую информацию об ионосферных параметрах, является моделирование. Даже если с помощью наблюдений можно будет решить задачу текущей диагностики ионосферы, то задачу прогноза можно решить только с помощью моделирования. Поэтому возможность оценки точности модельного полного $N(h)$ -профиля в любой пространственно-временной точке является важной задачей как экспериментальных, так и теоретических исследований. Расчет профилей по ионограммам дает ошибки, обусловленные методикой пересчета. Относительно высокую точность сравнения может обеспечить величина максимума электронной концентрации слоя F_2 , связанная с критической частотой простым соотношением $N_m F_2 = k f_0 F_2$. В спокойных геофизических условиях точность определения критической частоты достигает 0.1 МГц. Таким образом, возможная ошибка в определении $N_m F_2$ равна приблизительно 0.1-0.5% для дневных условий. Для ночных и ранних утренних часов ошибка больше: 2-5% [4, 5].

Результаты измерений собираются и обрабатываются в различных прогностических центрах. В России измерениями состояния ионосферы занимается Институт земного магнетизма и распространения радиоволн имени академика Пушкова российской Академии наук (ИЗМИРАН), Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова (ИПГ). Головным предприятием, которое занимается изучением поведения ионосферы в интересах хозяйственных нужд, решением Правительства РФ назначен ИПГ. На базе этого института воссоздается действовавшая когда-то в СССР единая сеть ионозондов. Размещение ионозондов вертикального зондирования ионосферы на территории России приведено на Рис. 1.

Ионозонды ВЗ различных типов размещены в следующих населенных пунктах (или вблизи них): Мурманск, Петрозаводск, Санкт-Петербург, Москва, Ростов, Новороссийск, Сочи, Волгоград, Астрахань, Нижний Новгород, Екатеринбург, Казань, Челябинск, Омск, Томск, Новосибирск, Красноярск, Иркутск, Норильск, Магадан, Якутск, Хабаровск, Находка, Владивосток, Восточный, Холмск.

Из данных ионозондов в состав ИПГ, по которым происходит регулярная оперативная выдача информации с темпом 15 минут, входят следующие: Иркутск,



Рис. 1: Карта российской сети ионозондов ВЗ (темные точки) (наклонные трассы ЛЧМ ионозондов показаны сплошными линиями, штриховая линия – планируемые трассы НЗ)

Калининград, Якутск, Троицк, Магадан, Тикси, Ростов, Норильск, Жиганск, Хабаровск, Йошкар-Ола, Нижний Новгород, Санкт-Петербург (см. Рис. 2).



Рис. 2: Размещение ионозондов вертикального зондирования на территории России

Как было отмечено ранее, наиболее информативным средством измерения параметров ионосферы являются станции некогерентного рассеяния. Размещение данных станций на мировой карте приведено на Рис. 3.

Общая схема размещения дигизондов на планете представлено на Рис. 4. Из рисунка видно, что ионозонды Рейниша распространены в большинстве наиболее технологически развитых стран и являются собственностью этих стран. Все они имеют одну особенность – каждая может получать практически сиюминутную информацию о состоянии ионосферы не только со своего дигизонда, но, отдавая

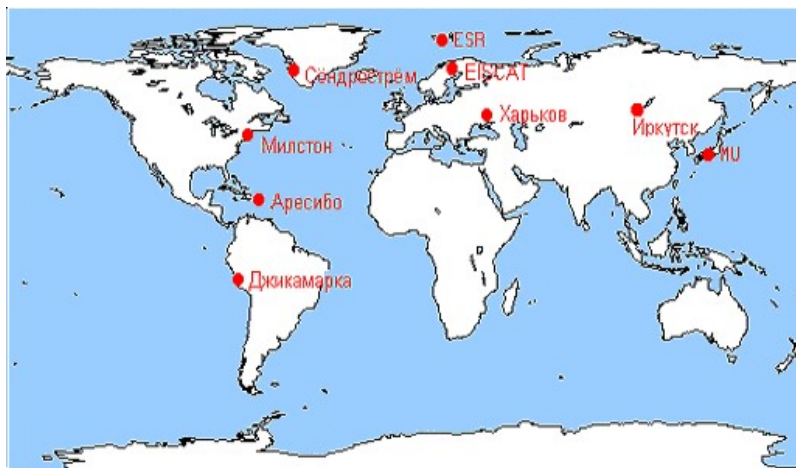


Рис. 3: Карта радаров некогерентного рассеяния

свои данные в общую сеть, могут получать их также и с любого другого ионозонда этой всемирной сети станций GIRO. Это, конечно, резко улучшает качество работ ионосферных служб каждой страны, имеющей дигизонды. Однако, вся сеть находится под американским контролем, и уже отмечено, что из тех районов, в которых ведут военные действия войска США, а также в некоторых других случаях, ионосферная информация в общую сеть перестает поступать.

Следует отметить, что наряду с данными станциями вертикального зондирования (ВЗ) ионосферы, входящими в состав ИПГ, имеется еще достаточно большое число станций ВЗ в составе различных НИИ РАН.

Используя богатейшие накопленные данные о состоянии ионосферы в различных точках Земли, созданы различные модели ионосферы, которые позволяют вести долгосрочный прогноз ее параметров. Прогнозные расчеты состояния ионосферы Земли для различных гелиогеофизических условий достаточно сложны. Они представляют интерес лишь в том случае, если удастся получить практически осуществимую программу оценки ее параметров, учитывающую всю сложность процессов, связанных с ее образованием, и дающую необходимую точность расчетов [6].

Под ионосферной моделью понимается описание состояния ионосферы (или ее части, например, модель области D), способное дать информацию о входящих в модель ионосферных характеристиках для заданной конкретной ситуации (набор параметров: время, координаты, $F_{10.7}$ и т.д.). Модель может быть представлена различным образом: в виде набора таблиц для разных ситуаций (так был представлен первый вариант Международной справочной модели IRI); в виде аналитических формул, прямо отражающих зависимость электронной концентрации $N(h)$ от высоты и других параметров; в виде программ для расчета ионосферных характеристик на ЭВМ (такая форма была использована в последующих выпусках модели IRI); наконец, в виде системы уравнений, учитывающих и описывающих основные процессы, контролирующие поведение ионосферы [6–8].

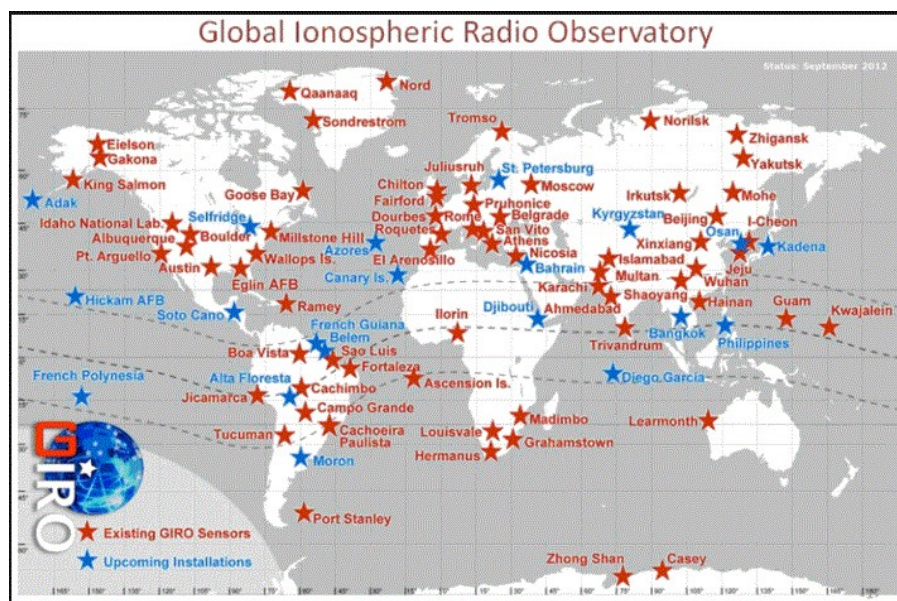


Рис. 4: Схема размещения дигизондов на планете

В настоящее время, принято делить все ионосферные модели на три группы (деление это, естественно, несколько условно и не имеет резких границ):

- эмпирические (статистические);
- теоретические;
- гибридные (полуэмпирические).

Особо следует отметить, что развитие теоретического моделирования и особенно свойство геофизической инвариантности структуры ионосферы открывает перспективы совместного использования трансionoсферного зондирования и соответствующих моделей. Действительно, в этом случае математическая модель ионосферы над обширным районом может корректироваться сотнями лучей трансionoсферного зондирования только при одном прохождении ИСЗ в самых различных направлениях, а пространственная структура $N(h)$ будет определяться как результат минимизации соответствующих невязок и, по-видимому, при использовании достаточно большого числа лучей станет адекватной реальности.

Наконец, идея нового метода контроля неоднородностей ионосферы сканированием по пространству трансionoсферными лучами открывает широкие перспективы для того, чтобы дополнить оперативный контроль структуры $N(h)$ одновременным контролем крупных неоднородностей ионосферы.

Наибольшую известность имеет совершенствуемая международная модель IRI (International Reference of Ionosphere – международная справочная модель ионосферы). Последние версии – IRI-2007 и IRI-2012 являются глобальной медианной моделью ионосферы (то есть позволяют строить долгосрочные прогнозы в любой

точке земного шара). Модель позволяет рассчитать профили электронной концентрации в областях D , E , F_1 и F_2 в диапазоне высот 65–1000 км для дня, 80–1000 км для ночи, температуру нейтрального газа по модели CIRA 1972, профили электронной и ионной температур в диапазоне высот 120–1000 км, концентрации положительных ионов различных типов, частоту соударений и сведения об отрицательных ионах в D -области. Модель предназначена для описания медианных значений указанных ионосферных параметров для различных широтных зон, сезонов и уровней солнечной активности. По высоте и электронной концентрации в максимуме слоя F_2 , модель привязана к значениям, описываемым статистическими планетарными моделями, подобным моделям ИПГ, ИЗМИРАН [9,10], возможна привязка наблюдений к уже имеющимся массивам наблюдений. Кроме того, в данной модели достаточно просто реализуется метод коррекции модельных значений по данным реальных наблюдений. Основным недостатком модели IRI является то, что она не дает детального хода профиля ниже 200 км, практически неприемлема для высоких широт и описывает гораздо хуже дальневосточный регион России по сравнению с отечественными моделями [11, 12].

Ионосфера испытывает очень сложные пространственно-временные вариации, связанные с наличием геомагнитного контроля, влиянием солнечной активности, электрических полей, термосферной циркуляции, с метеорологическими образованиями в нижней и средней атмосфере. Далее, механизмы образования ионосферы на разных высотах оказываются различными, и такой важный параметр, как электронная концентрация, может изменяться независимо в разных областях ионосферы.

Из сказанного ясно, что построение модели ионосферы какого-либо типа, обладающей удовлетворительной точностью описания, в настоящее время вряд ли возможно, прежде всего, из-за отсутствия необходимого объема данных наблюдений различных параметров ионосферы. Статистически обеспеченными являются, пожалуй, лишь массивы данных по критическим частотам слоев E , F_1 и F_2 , полученные в результате наблюдений на мировой сети станций вертикального ионосферного зондирования за несколько циклов солнечной активности. Планетарные модели, построенные на основе этих месячных медианных значений критических частот, с успехом используются, например, при долгосрочном ионосферном прогнозировании. Эти модели верно отражают сезонно-широтные изменения, зависимость от среднемесячного уровня солнечной активности, учитывают региональные особенности. Поэтому их можно использовать как фоновые (климатические) модели, прежде всего, для долгосрочного прогнозирования. В то же время эти модели нельзя применять для описания ежедневных значений критических частот, когда на первый план выступают вариации, связанные с «погодными» факторами. В случае описания конкретной ситуации ошибка может возрасти до сотен процентов.

Следовательно, при проведении плановых мероприятий радиоконтроля (предстоящем сеансе радиосвязи) необходимо уточнить с помощью краткосрочного и оперативного прогноза: а будет ли вообще связь в заданное время и на заданной частоте. И в зависимости от полученных данных принимать решение о ведении связи. То же самое должно выполняться и при планировании времени работы загоризонтных средств локации, только в отличие от средств связи, необходимо прогнозировать возможное время отсутствия условий обнаружения объектов по

причинам геофизических возмущений на трассе локации.

3. Методы решения задачи повышения точности прогноза

Для разработки алгоритма прогноза времени работоспособного состояния загоризонтных средств, в качестве прототипа можно взять разработанную методику прогноза КВ связи, которая реализована в программном варианте и приведена в работе [13–15].

Специалистами НПФ «Радиян-М» разработано специальное программное обеспечение «Прогноз прохождения радиоволн и доступности связи на заданных частотах», которое включено в состав Автоматизированной системы радиоконтроля ФГУП «РЧЦ ЦФО» (АСРК-ЦФО). В качестве примера, общий вид расчетного модуля при проведении краткосрочного прогноза для трех радиоконтрольных пунктов приведен на Рис. 5.

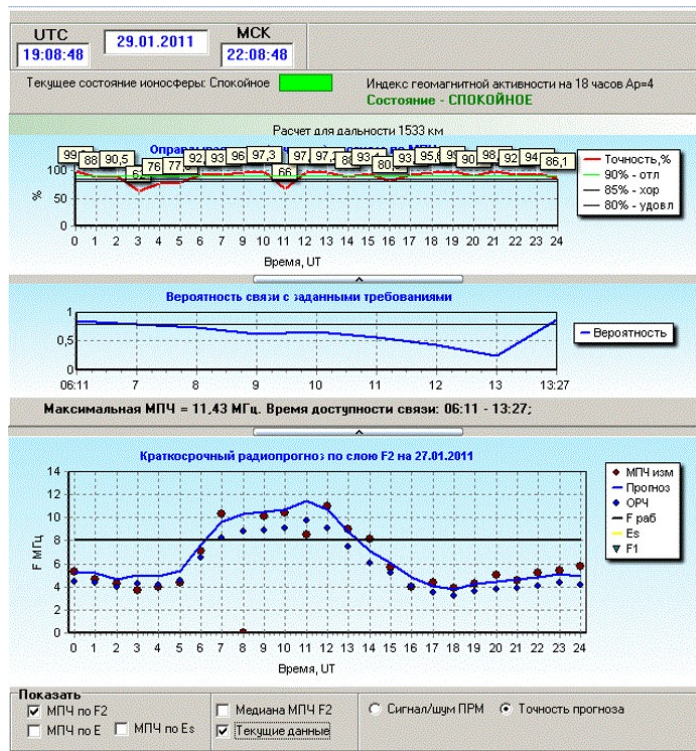


Рис. 5: Общий вид расчетного модуля

В соответствии с разработанным алгоритмом, для обеспечения надежной радиосвязи рабочие частоты, определяемые по долгосрочным прогнозам, следует систематически корректировать. Для корректировки необходимо использовать краткосрочные и оперативные радиопрогнозы, которые должны содержать также информацию о возмущениях в ионосфере.

Краткосрочные прогнозы с информацией о возмущениях составляются на несколько суток вперед. Оперативные – на несколько часов вперед, обычно до 12 часов. Они уточняют, как правило, только верхний предел диапазона применяемых частот (МПЧ). Краткосрочные и оперативные прогнозы составляются с использованием данных о текущем состоянии ионосферы в точках отражения радиолуча от ионосферы.

Оправдываемость краткосрочных прогнозов растет по мере укорочения срока прогнозирования. Для месячных прогнозов она составляет в среднем 80%, для пятидневных – 85%, а для оперативных полусуточных – 90%. Следует отметить, что оправдываемость долгосрочных месячных прогнозов по МПЧ составляет 50%. Такая точность не удовлетворяет требованиям оперативной работы радиотехнических средств связи.

Данный модуль позволяет рассчитывать время гарантированной связи с пунктом приема радиоинформации (для заданной частоты) с требуемым качеством и надежностью, что достигается применением коррекции долгосрочных прогнозов – краткосрочными и реальными измерениями характеристик ионосферы в районах входа луча в ионосферу.

Учитывая существующие возможности контроля параметров слоя F_2 практически над всей территорией РФ, а также над водными акваториями и даже над территорией зарубежных стран, можно путем использования трансionoсферного зондирования с помощью системы ГЛОНАСС осуществлять коррекцию модели ионосферы по текущим измерениям во всех требуемых направлениях работы средств связи и локации КВ диапазона. Измерение значений полного электронного содержания для заданного района ионосферы составляет 1-2 минуты [1, 2], что меньше времени стационарности ионосферы, которое составляет 5-10 минут [4].

Следовательно, данный темп измерения параметров ионосферы приемлем для обновления информации о текущем состоянии ионосферы и позволит не пропустить каких-либо быстрых изменений параметров среды в период магнито-ионосферных возмущений. Данный подход реализован в малогабаритном аппаратно-программном комплексе определения максимально применимых частот (АПК-МПЧ), обеспечивающем расчет в реальном масштабе времени указанных параметров ионосферы в пассивном (без излучения радиосигналов) режиме в различных азимутальных направлениях на удалении до 1000 км от места установки комплекса [16].

В качестве примера на Рис. 6 приведены проекции зон контроля ионосферы на Землю с помощью малогабаритного комплекса АПК-МЧС в состав которого входят: двухчастотные навигационные приемники, позволяющие определять лишь ПЭС ионосферы, ноутбук с программным обеспечением, спутниковая антенна с кабелем. Внешний вид данного комплекса представлен на Рис. 7.

Использование одного АПК-МПЧ позволяет в реальном масштабе времени производить с достаточной точностью определение МПЧ для задаваемых оператором односкачковых КВ радиолиний, протяженностью до 2000 км.

Для обеспечения надежной КВ радиосвязи на более протяженных (в том числе, многоскачковых радиотрассах) требуется объединение нескольких территориально распределенных АПК-МПЧ в единую систему оперативного контроля ионосферы. Для повышения достоверности получаемых ионосферных данных в состав подобной системы оперативного контроля ионосферы целесообразно вклю-

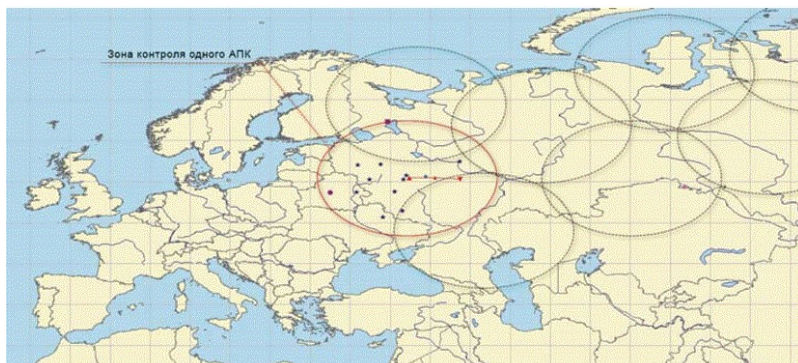


Рис. 6: Карта проекций зон контроля АПК-МПЧ



Рис. 7: Внешний вид элементов АПК-МПЧ (слева-направо: спутниковая тарелка, навигационный приемник, ноутбук)

чать также другие наземные средства контроля ионосферы, в том числе средства активного зондирования ионосферы (например, станции вертикального, наклонного и возвратно-наклонного зондирования). Ионозонды вертикального зондирования позволят получить профиль электронной концентрации ниже максимума слоя F_2 и тем самым откорректировать модельные расчеты. Следует отметить, что наибольшее значение имеет точный прогноз оптимальных рабочих частот для декаметровых средств, работающих в непрерывном режиме. В частности, к таким средствам относятся загоризонтные радиолокаторы ионосферной волны.

На основе представленного выше материала рассмотрим последовательность разработки аппаратно-программного комплекса, обеспечивающего достоверный прогноз условий функционирования загоризонтного радиолокатора декаметрового диапазона. Структурная схема в соответствии с которой осуществляется точный прогноз рабочих частот и состояния радиотрассы для РЛС ЗГО приведена на Рис. 8.

Последовательность действий при организации точного прогнозирования включает следующие этапы:

1. В зависимости от места дислокации РЛС ЗГО, выбирается глобальная модель ионосферы, выходные данные которой можно достаточно просто корректировать реальными измерениями параметров ионосферы и входными гелиогеофизическими данными.



Рис. 8: Структурная схема проведения точного прогноза характеристик радиотрасс на основе гелиогеофизических данных

2. Определяется состав комплекса средств диагностики характеристик ионосферы в районе входа радиолуча в ионосферу.
3. Оценивается возможность получения гелиогеофизической информации от действующих средств, входящих в состав НИИ РАН РФ, организуется линия связи для получения необходимой информации.
4. В любом случае (есть ли возможность получать необходимую информацию от средств ИПГ им. академика Е. К. Федорова и других учреждений РАН РФ или ее нет) в месте дислокации РЛС ЗГО разворачивается автономный диагностический комплекс (АДК) измерения параметров ионосферы.

Минимальный состав АДК включает: ионозонд, работающий в автоматическом режиме и аппаратно-программный комплекс определения полного электронного содержания для заданного района ионосферы.

С помощью программно-алгоритмического обеспечения (ПАО) осуществляется коррекция глобальной модели ионосферы, выполняются расчеты лучевых траекторий распространения радиоволн для заданной дальности, величин ослабления сигнала на радиотрассе и величин девиации принимаемых сигналов.

При наличии магнито-ионосферных возмущений, прерывающих распространение радиоволн, программно-алгоритмическое обеспечение формирует признак «аномальности» радиотрассы по геофизическим условиям.

Из приведенных выше пунктов, рассмотрим методику коррекции глобальной модели ионосферы по данным вертикального зондирования. Коррекция модели данными ТИЗ рассмотрена подробно в работах [2, 3], проверена экспериментально [4] и ее можно использовать в готовом виде. Для среднеширотных радиотрасс в качестве глобальной модели можно взять модели IRI (2012) или SIMP2. Обе они удовлетворяют требованиям к моделям пригодным для коррекции [16]. Входными

данными для моделей являются: географические или геомагнитные координаты (широта, долгота); дата, на которую производится расчет; время по Гринвичу (UT) и уровень солнечной активности. Адаптационными параметрами модели являются f_0 , h_m , $N_e(h)$ и ТЕС (полное электронное содержание в английской транскрипции), а также индекс солнечной активности. Таким образом, оперативность и точность описания ионосферы (или ионосферного обеспечения) будет определяться оперативностью поставки адаптационных параметров и их качеством. Для одной локальной РЛС ЗГО достаточно автономного диагностического комплекса, для многих радиоэлектронных средств, размещенных на такой большой территории, как Россия, необходимо определение параметров ионизированной среды в глобальном масштабе. Для этого требуется эффективная система мониторинга параметров ионосферы, которая включает в себя:

- измерительные средства;
- линии передачи информации (в том числе спутниковые);
- центр сбора и обработки ионосферной информации.

Такая инфраструктура уже существует и действует в интересах широкозонных дифференциальных систем (ШДС), ГЛОНАСС/GPS.

4. Результаты коррекции глобальной модели в соответствии с разработанной методикой

Рассмотрим методику коррекции модели IRI для отдельного участка ионосферы по данным ионозондов ВЗ, расположенных на достаточно большом расстоянии. Размещение ионозондов, выбранных для эксперимента, приведено на Рис. 9 [16].

В результате совместных измерений мы получаем набор экспериментальных данных, состоящий из четырех одновременных вертикальных ионограмм наземного зондирования. По ним можно достаточно точно восстановить профиль до высоты максимума.

Проанализировав имеющиеся экспериментальные данные, можно сделать следующие выводы.

Первое. Так как у нас слишком мало данных, и все они привязаны к областям вблизи конкретных точек расположения ионозондов и по высоте ограничены только высотами HmF_2 , не дают общего описания состояния ионосферы во всей интересующей нас области, то необходимо в качестве базовой использовать глобальную модель ионосферы. Здесь используется модель IRI-2012.

Второе. У нас есть данные только для небольшого числа дискретных точек, а мы хотим описать непрерывное поведение ионосферы в некотором достаточно обширном районе (допустим, в контурах прямоугольника на Рис. 9). Необходимо также учесть, что общая структура и поведение ионосферы изменяются в исследуемой области в зависимости от географических координат (и именно эти изменения в усредненном виде описываются моделью). Поэтому, на наш взгляд, разумнее будет пользоваться не абсолютными значениями характеристик, а их отличием от предложенных моделью значений. Таким образом, мы сможем более просто установить наличие отклонений (возмущений). Кроме того, функция зависимости отклонений от координат будет более гладкой, чем зависимость от самих

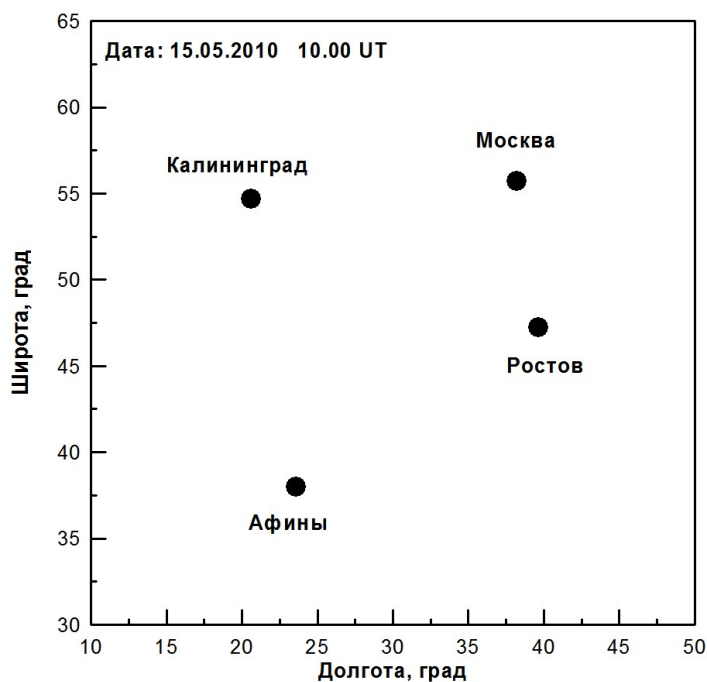


Рис. 9: Схема моделируемого эксперимента

параметров (например, критической частоты, которая априори должна зависеть от координат).

На основании всего перечисленного выше был выбран следующий поэтапный план обработки.

1. По экспериментальным данным наземного зондирования (вертикальным ионограммам) восстанавливаются профили внутренней ионосферы (до высоты максимума).
2. На основании этих профилей находят их отличия от IRI для основных параметров (E -области, долины, областей F_1 и F_2).
3. Имея все полученные отклонения от модельных параметров, можно восстановить трехмерную ионосферу в нашей исследуемой области.

Рассмотрим более конкретно данные этапы.

1. Из результатов работы ионозонда получаем значения высот и критических частот существующих ионосферных слоев (E , F_1 и F_2).
2. Из модели IRI получаем модельные значения этих же данных в точках расположения ионозондов на текущее время.

3. Находим коэффициент отношения реальных значений к модельным, например, для критической частоты слоя F_2 –

$$K_{f_0F_2} = \frac{f_0F_{2REAL}}{f_0F_{2MODEL}}. \quad (1)$$

Аналогично и для других параметров ионосферы (h_oF_2 , f_oF_1 , h_oF_1 , f_oE , h_oE). Именно с этими коэффициентами и будем работать далее. Причина этого указана выше.

Зная все эти коэффициенты в точках ионозондов, можно найти их значения (этих коэффициентов) и в любой другой точке. Они рассчитываются путем аппроксимации. Для этого был выбран метод кригинга.

Далее в этой же точке находятся модельные параметры IRI.

Путем обратного пересчета из коэффициентов и модельных значений находим «реальные» значения высот и частот, например,

$$f_0F_{2REAL_1} = K_{f_0F_{2_1}} \cdot f_0F_{2MODEL_1}. \quad (2)$$

Здесь индекс «1» указывает на номер исследуемой точки.

Применяя эту методику, можно получить основные параметры слоев ионосферы в любой точке и, подставив их в модель IRI, построить «реальный» профиль, описывающий поведение ионосферы в данный момент времени.

Восстановив таким образом новый «реальный» профиль в узлах сетки выбранной нами области, получим требуемый результат – скорректированный вариант ионосферы. Для одного ионозонда коррекция модели ограничивается областью радиуса 500 км от места стояния ионозонда.

Заключение

В работе предлагается для радиолокационных средств декаметрового диапазона использовать метод коррекции глобальных моделей ионосферы по данным ионозондов вертикального зондирования (снизу) и данным трансionoсферного зондирования (сверху). Эта коррекция позволит повысить точность прогноза рабочих частот до 85-90%. Наличие автономного диагностического комплекса измерения параметров ионосферы в составе РЛС повысит достоверность его работы при магнито-ионосферных возмущениях. Достаточно невысокая стоимость автономного диагностического комплекса позволит его использовать и для других радиоэлектронных средств, где необходимо учитывать влияние ионосферы.

Список литературы

- [1] Захаров А.И., Яковлев О.И., Смирнов В.М. Спутниковый мониторинг Земли: Радиолокационное зондирование поверхности. М.: КРАСАНД, 2012. 248 с.
- [2] Смирнов В.М., Смирнова Е.В., Ружин Ю.Я., Тынянкин С.И., Скобелкин В.Н., Мальковский А.П. Верификация данных аппаратно-програмного комплекса зондирования ионосферы и ионозонда DPS-4. г. Фрязино: ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН; г. Троицк: ИЗМИРАН, 2013.

- [3] Смирнов В.М. Метод мониторинга ионосферы Земли на основе использования навигационных спутниковых систем : дисс. ... докт. физ.-мат. наук. М.: ФИРЭ РАН, 2007. 300 с.
- [4] Смирнов В.М., Тынянкин С.И., Гузенко О.Б. Ионосферное обеспечение средств коротковолновой связи с использованием спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS. г. Фрязино: ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН; М.: Инновационный научно-технический центр, 2012.
- [5] Керблай Т.С., Васильева Т.Н. О точности определения горизонтального градиента f_0F_2 с помощью различных моделей ионосферы // Диагностика и моделирование ионосферных возмущений. М.: Наука, 1978. С. 213–221.
- [6] Иванов-Холодный Г.С., Михайлов А.В. Прогнозирование состояния ионосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 190 с.
- [7] Гуревич А.В., Фищук Д.И., Цедилина Е.Е. Трехмерная аналитическая модель распределения электронной концентрации спокойной ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 1973. Т. 13. С. 31.
- [8] Кадухин Г.Ф., Соболева Т.Н. Эмпирическая модель высотно-суточных вариаций электронной концентрации в среднеширотной ионосфере на высотах 50–900 км в равноденственных условиях высокой солнечной активности // Распространение радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 1978. 137 с.
- [9] Ануфриева Т.А., Шапиро Б.С. Геометрические параметры слоя F_2 ионосферы. М.: Наука, 1976. 90 с.
- [10] Власков В.А., Оглоблина О.Ф. Аналитическая модель высокоширотной F_2 -области // Распределение электронов и физические процессы в полярной ионосфере. Апатиты: изд. Кольского филиала АН СССР, 1981. С. 3–12.
- [11] Радиозондирование ионосферы спутниковыми и наземными ионозондами // Труды Института прикладной геофизики им. академика Е.К. Федорова. Выпуск 87. Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды / Под ред. д.т.н., проф. С.И. Авдюшина. М., 2008. 210 с.
- [12] Шубин В.Н., Карпачев А.Т., Телегин В.А., Цыбуля К.Г. SM2 Глобальная модель F_2 -слоя максимального пикового значения от спутниковых и наземных наблюдений // Журнал атмосферной и солнечно-земной физики. М.: ИЗМИРАН, 2015.
- [13] Шумейко Е.Г. Роль и место приемных центров радиосвязи и радиовещания в системе управления использованием радиочастотного спектра. Доклад начальника управления по радиоконтролю. 23.08.2011. Сайт НПФ «Радиян-М»
- [14] Ладанов М.В., Ведищев А.М., Кизима С.В., Лавров Г.В. Планирование радиосвязи на коротких волнах для магистральных радиотрасс // Электросвязь. 2012. № 9. С. 3–8.

- [15] Кизима С.В., Ладанов М.В. Ионосферное обеспечение радиосвязи и радиомониторинга в декаметровом диапазоне частот (1,5–30 МГц) // Электросвязь. 2013. № 7. С. 28–31.
- [16] Smirnov V.M., Tynyankin S.I. The method of determining the parameters of the ionosphere and device for its implementation. Patent for invention No 2421753 of 20.06.2011.
- [17] Жбанков Г.С., Тихонов В.В. Способ коррекции модели ионосферы по данным вертикального зондирования для заданного региона // Научно-методический сборник ЦНИИ ВКО. 2016. № 1 (543) (в печати).

Библиографическая ссылка

Арефьев В.И., Кочерова М.К., Талалаев А.Б., Тихонов В.В. Методы диагностики характеристик ионосферы для заданного региона и коррекция моделей ионосферы в интересах повышения точности прогнозирования распространения радиоволн декаметрового диапазона // Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика. 2016. № 1. С. 33–51.

Сведения об авторах

1. Арефьев Владимир Игоревич

заместитель начальника отдела ЗАО «Радиотехнические и информационные системы воздушно-космической обороны».

170041, г. Тверь, ул. Зинаиды Коноплянниковой, д. 89, к. 1, ЗАО «РТИС ВКО».

2. Кочерова Марина Константиновна

научный сотрудник ЗАО «Радиотехнические и информационные системы воздушно-космической обороны».

170041, г. Тверь, ул. Зинаиды Коноплянниковой, д. 89, к. 1, ЗАО «РТИС ВКО».

3. Талалаев Александр Борисович

генеральный директор ЗАО «Радиотехнические и информационные системы воздушно-космической обороны».

170041, г. Тверь, ул. Зинаиды Коноплянниковой, д. 89, к. 1, ЗАО «РТИС ВКО».

4. Тихонов Владимир Васильевич

старший научный сотрудник ЗАО «Радиотехнические и информационные системы воздушно-космической обороны».

170041, г. Тверь, ул. Зинаиды Коноплянниковой, д. 89, к. 1, ЗАО «РТИС ВКО».

**METHODS OF DIAGNOSTICS OF CHARACTERISTICS
OF THE IONOSPHERE FOR A GIVEN REGION AND CORRECTION
OF IONOSPHERIC MODELS IN ORDER TO IMPROVE
THE ACCURACY OF PREDICTING THE PROPAGATION
OF RADIO WAVES OF DECAMETER RANGE**

Arefiev Vladimir Igorevich

Deputy Head of department, CJSC "RTIS VKO"
Russia, 170041, Tver, 89 corp. 1 Zinaidy Konopliannikovoy str.

Kocherova Marina Konstantinovna

Researcher, CJSC "RTIS VKO"
Russia, 170041, Tver, 89 corp. 1 Zinaidy Konopliannikovoy str.

Talalaev Aleksandr Borisovich

CEO, CJSC "RTIS VKO"
Russia, 170041, Tver, 89 corp. 1 Zinaidy Konopliannikovoy str.

Tikhonov Vladimir Vasilievich

Senior Researcher, CJSC "RTIS VKO"
Russia, 170041, Tver, 89 corp. 1 Zinaidy Konopliannikovoy str.

Received 28.01.2016, revised 26.02.2016.

The paper proposes a technique which allows to adjust global model of the ionosphere based on its current measurements. A review of existing means for diagnostic of the ionosphere characteristics is made. The minimum composition of the autonomous complex for measurement of ionosphere parameters as well as the necessity of heliogeophysical monitoring of the ionosphere in the interest of radio electronic equipment are justified.

Keywords: ionosphere, decameter range of waves, the vertical sounding ionosonde, total electron content, navigation systems GLONASS, GPS, radio conditions.

Bibliographic citation

Arefiev V.I., Kocherova M.K., Talalaev A.B., Tikhonov V.V. Methods of diagnostics of characteristics of the ionosphere for a given region and correction of ionospheric models in order to improve the accuracy of predicting the propagation of radio waves of decameter range. *Vestnik TverGU. Seriya: Prikladnaya Matematika* [Herald of Tver State University. Series: Applied Mathematics], 2016, no. 1, pp. 33–51. (in Russian)

References

- [1] Zaharov A.I., Yakovlev O.I., Smirnov V.M. *Sputnikovyj Monitoring Zemli: Radiolokacionnoe Zondirovanie Poverhnosti* [Satellite Monitoring of the Earth: Radar Probing of the Surface]. KRASAND Publ., Moscow, 2012. 248 p. (in Russian)
- [2] Smirnov V.M., Smirnova E.V., Ruzhin Yu.Ya., Tynyankin S.I., Skobelkin V.N., Mal'kovskii A.P. *Verifikatsiya Dannykh Apparatno-Programnogo Kompleksa Zondirovaniya Ionosfery i Ionozonda DPS-4* [Data Verification of Hardware-Software Complex for Ionosphere Probing and Ionosonde DPS-4]. G. Fryazino: FIRE im. V.A.Kotel'nikova RAN; g. Troitsk: IZMIRAN, 2013. (in Russian)
- [3] Smirnov V.M. *Metod Monitoringa Ionosfery Zemli na Osnove Ispol'zovaniya Navigatsionnykh Sputnikovykh Sistem* [Method of Monitoring the Earth's Ionosphere through the use of Navigation Satellite Systems]. PhD Thesis. FIRE RAN Publ., Moscow, 2007. 300 p. (in Russian)
- [4] Smirnov V.M., Tynyankin S.I., Guzenko O.B. *Ionosfernoe Obespechenie Sredstv Korotkovolnvoi Svyazi s Ispol'zovaniem Sputnikovykh Navigatsionnykh Sistem GLONASS/GPS* [Means Provided by Ionosphere for Short-Wave Communication Using Satellite Navigation Systems GLONASS/GPS]. G. Fryazino: FIRE im. V.A. Kotel'nikova RAN; Moscow, Innovatsionnyi nauchno-tehnicheskii tsentr, 2012. (in Russian)
- [5] Kerblai T.S., Vasil'eva T.N. On the accuracy of determination of horizontal gradient f_0F_2 using different models of the ionosphere. *Diagnostika i Modelirovanie Ionosfernykh Vozmushchenii* [Diagnostics and Modeling of Ionospheric Disturbances]. Nauka Publ., Moscow, 1978. Pp. 213–221. (in Russian)
- [6] Ivanov-Kholodnyi G.S., Mikhailov A.V. *Prognozirovanie Sostoyaniya Ionosfery* [Ionosphere State Forecasting]. Gidrometeoizdat, SPb, 1980. 190 p. (in Russian)
- [7] Gurevich A.V., Fishchuk D.I., Tsedilina E.E. Three-dimensional analytical model of the electron concentration distribution in still ionosphere. *Geomagnetizm i Aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy], 1973, no. 13, p. 31. (in Russian)
- [8] Kadukhin G.F., Soboleva T.N. An empirical model for the altitude and diurnal variations of electron concentration in the midlatitude ionosphere at the altitude 50-900 km ravnodenstviya in conditions of high solar activity. *Rasprostranenie Radiovoln v Ionosfere* [Propagation of Radio Waves in the Ionosphere]. Nauka Publ., Moscow, 1978. 137 p. (in Russian)
- [9] Anufrieva T.A., Shapiro B.S. *Geometricheskie Parametry Sloya F_2 Ionosfery* [The Geometrical Parameters of the Layer F_2 of the Ionosphere]. Nauka Publ., Moscow, 1976. 90 p. (in Russian)
- [10] Vlaskov V.A., Ogloblina O.F. Analytical model of high-latitude F_2 field of electrons. *Raspredelenie Elektronov i Fizicheskie Protsessy v Polyarnoi Ionosfere* [Distribution and Physical Processes in the Polar Ionosphere]. Kol'skij filial AN SSSR Publ., Apatity, 1981. Pp. 3–12. (in Russian)

- [11] Radio-Sounding Ionosphere by Satellite and Terrestrial Ionosondes. *Trudy Instituta Prikladnoi Geofiziki im. Akademika E.K. Fedorova* [Proceedings of Institute of Applied Geophysics named after Academician E.K. Fedorov], no. 87. Ed. by PhD., prof. S.I. Avdyushina. Moscow, 2008. 210 p. (in Russian)
- [12] Shubin V.N., Karpachev A.T., Telegin V.A., Tsybulya K.G. SM2 global model F_2 -layer peak maximum from satellite and ground observations. *Zhurnal Atmosfernoi i Solnechno-Zemnoi Fiziki* [Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics]. IZMIRAN Publ., Moscow, 2015. (in Russian)
- [13] Shumeiko E.G. *Rol' i Mesto Priemnykh Tsentrov Radiosvyazi i Radioveshchaniya v Sisteme Upravleniya Ispol'zovaniem Radiochastotnogo Spektra* [The Role and Place of Radio Reception and Broadcasting Centers in Radio Spectrum Management System]. Report of the Chief of management on Spectrum Monitoring. 23.08.2011. Website SPC «Radian-M». (in Russian)
- [14] Ladanov M.V., Vedishchev A.M., Kizima S.V., Lavrov G.V. Planning of radio communication on short waves for the main transmission paths. *Elektrosvyaz'* [Telecommunications], 2012, no. 9, pp. 3–8. (in Russian)
- [15] Kizima S.V., Ladanov M.V. Ionospheric radio and radio monitoring in the decameter range of frequencies (MHz 1,5–30). *Elektrosvyaz'* [Telecommunications], 2013, no. 7, pp. 28–31. (in Russian)
- [16] Smirnov V.M., Tynyankin S.I. *The Method of Determining Parameters of the Ionosphere and Device for its Implementation*. Patent for invention No 2421753 of 20.06.2011. (in Russian)
- [17] Zhbakov G.S., Tikhonov V.V. The method of correcting the model of the ionosphere by the data of vertical sounding for the specified region. *Nauchno-Metodicheskii Sbornik TsNII VKO* [Scientific-Methodical Collection of the CSRI MSO], 2016, no. 1 (543) (in print). (in Russian)